

Влияние длительной когнитивной нагрузки на параметры ЭЭГ

И.С. Поликанова, А.В. Сергеев Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила: 26 августа 2014/ Принята к публикации: 30 сентября 2014

The effect of long-term cognitive load on the EEG parameters

Irina S. Polikanova Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Alexander V. Sergeev Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Received August 26, 2014 / Accepted for publication: September 30, 2014

Исследовалось влияние длительной когнитивной нагрузки на субъективное состояние (опросник САН) и электрофизиологические показатели (индивидуальный альфа-ритм (ИАР), спектральные характеристики электроэнцефалограммы (ЭЭГ), индекс утомления (ИУ)). Когнитивная, или умственная, нагрузка моделировалась с помощью непрерывного решения испытуемым различных когнитивных заданий, направленных преимущественно на рабочую память и внимание, в течение 2,5 часов. До и после выполнения испытуемым умственной работы проводилась фоновая запись ЭЭГ и заполнение опросника САН. Анализ результатов исследования проводился путем статистического сравнения полученных данных до и после нагрузки. Результаты исследования показывают, что длительная когнитивная нагрузка значимо отражается на субъективной сфере в снижении самочувствия и активности испытуемого. На электрофизиологическом уровне такая нагрузка приводит к снижению частоты индивидуального альфа ритма, обширному увеличению индекса утомления, а также увеличению средних мощностей тета-, альфа- и бета-ритмов. Таким образом, когнитивная нагрузка отражается в значимых сдвигах динамики мозговой активности, проявляющейся как в достаточно динамичных параметрах, таких как мощности альфа- и бета-ритмов; но также и в более стабильных показателях, как например, индивидуальный альфа-ритм и индекс утомления. По результатам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что значительная умственная работа приводит к значимому увеличению мощности медленно-волновой активности мозга и ухудшению субъективного самочувствия. Полученные результаты, с одной стороны, согласуются с литературными данными, а с другой стороны – носят интегративный характер, объединяя данные различных исследований, и таким образом, создают более комплексный взгляд на процесс умственного утомления с точки зрения мозговой динамики.

Ключевые слова: утомление, когнитивная нагрузка, ЭЭГ, время реакции, индивидуальный альфа ритм, индекс утомления, субъективные показатели

The influence of long-term cognitive load on the individual condition (HEM Questionnaire) and also electrophysiological parameters (individual alpha rhythm (IAR), the spectral characteristics of the electroencephalogram (EEG), fatigue index (IS)). Cognitive or mental load was simulated by a series of continuous solutions of various cognitive tasks assigned that were aimed mainly on working memory and attention within the time limit of 2.5 hours. Before and after the test we were making records of background EEG and the participants were completing HEM questionnaires. Analysis of the results of research conducted by the statistical comparison of the data obtained before and after exercise. The results show that long-term cognitive load significantly tells on the subjective sphere and the activity of the participant. On the electrophysiological level, the load results in a decrease of individual alpha rhythm frequency, a vast increase in the fatigue index, and also the increase of average power of theta, alpha and beta rhythms. Thus, the cognitive load is reflected in the significant shift of brain activity dynamics manifested as quite dynamic parameters of the alpha and beta rhythms power, this being in a more stable performance, such as individual alpha rhythm and the fatigue index. Summing up, a significant mental work leads to a significant increase in the power of slow-wave activity in the brain and the deterioration of the subjective well-being. On the one hand, the results of the research correspond with the literature data and, on the other hand, the results are integrating the data of various studies and consequently provide a more comprehensive view of the process of mental fatigue in terms of the dynamics of the brain.

Keywords: fatigue, cognitive load, EEG, reaction time, the individual alpha rhythm, the fatigue index, subjective indicators

Многочисленные исследования, проведенные в области психофизиологии утомления, показали, что различные показатели ЭЭГ коррелируют с параметрами утомления. К таким показателям можно отнести увеличение мощностей медленных ритмов (тета- и альфа-ритмов), индивидуальный альфа-ритм, индекс утомления. Выявлены общие тенденции в динамике различных параметров (субъективных, поведенческих, электрофизиологических) в условиях длительных когнитивных нагрузок. Особенности сдвигов параметров, как правило, связаны со спецификой выполняемых заданий, их длительностью и вовлеченностью различных мозговых систем. Так, в ряде исследований показано, что утомление вызывает увеличение мощности альфа-ритма в теменных и затылочных областях и тета-ритма в лобных областях (Boksem et al, 2006; Jar, 2009; Cheng, 2011, Trejo et al, 2005, Lal et al, 2007). Буксем установил, что после длительной когнитивной нагрузки мощность тета-ритма значительно повышается во фронтальных медиальных электродах, мощность нижнего альфа-ритма становится выше в теменных областях, а мощность верхнего альфа-ритма растет в затылочных регионах (Boksmen et al, 2005). Трейо выявил, что после трех часов непрерывного решения арифметических задач наблюдается значимое увеличение мощности фронтального

тета-ритма и теменного альфа-ритма (Trejo et al, 2005). Лэл и Крейг обнаружили в своем исследовании на примере имитации ситуации вождения у профессиональных водителей и непрофессионалов в двух независимых сериях, что тета-ритм обладает тенденцией к увеличению при длительной когнитивной нагрузке и характеризуется высокой степенью воспроизводимости (Lal et al, 2007). В другом исследовании Лэл и Бекларис показали на примере имитации ситуации вождения у опытных водителей, что ситуация, требующая усиленного внимания в течение длительного времени, отражается на ЭЭГ увеличением мощности тета-ритма и уменьшением мощности альфа-ритма. При проведении повторного эксперимента была доказана достоверность этих данных

длит к подавлению альфа-ритма на ЭЭГ (Klimesh, 1997).

Ряд исследователей отмечают уменьшение бета-ритма во фронтальных областях после длительной когнитивной нагрузки (Jar, 2009; Lal et al, 2007), хотя некоторые ученые, наоборот, отмечают увеличение мощности бета-ритма во время длительного выполнения когнитивных задач. Буксем выявил увеличение бета-ритма после длительной когнитивной нагрузки во фронтальных отведениях (F3, F4). (Boksmen et al, 2005). Климеш предполагает, что увеличение мощности в нижнем бета-диапазоне связано с увеличением усилий, которые необходимо приложить испытуемому для поддержания высокой концентрации внимания во время выполнения заданий (Klimesh, 1999).

Интересным параметром в диагно-

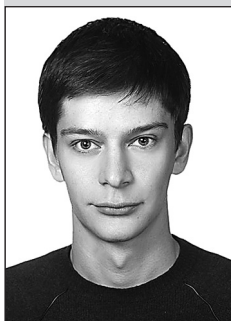
Интересным параметром в диагностике сдвигов функционального состояния является так называемый индекс утомления (ИУ), отражающий отношения ритмов ЭЭГ

(Lal et al, 2007). Ченг с соавторами выявили, что после трех часов непрерывного решения фланкерной задачи (Eriksen flanker task) наблюдается увеличение мощности тета-ритма и уменьшение мощности альфа-ритма (Cheng, 2011). Снижение мощности альфа-ритма после решения арифметических задач некоторые ученые объясняют тем, что подобная когнитивная нагрузка требует включения рабочей памяти, что приво-

длит к сдвигам функционального состояния является так называемый индекс утомления (ИУ), отражающий отношения ритмов ЭЭГ. Было исследовано несколько таких индексов, показывающих отношения различных ритмов. Ченг с соавторами исследовали также эффективность использования различных алгоритмов, отражающих соотношение мощностей ритмов ЭЭГ, для определения состояния утомления. Они использовали 3 индекса: тета/альфа, бета/альфа, альфа+тета/бета. В ходе эксперимента выяснилось, что лучшие результаты по детекции утомления были получены с помощью индекса альфа+тета/бета (Cheng, 2011). Джар с соавторами также исследовали различные алгоритмы вычисления индекса утомления: тета+альфа/бета, альфа/бета, альфа+тета/альфа+бета, тета/бета (Jar, 2009). Они, также как и Ченг, показали, что алгоритм тета+альфа/бета имеет наибольшее увеличение после длительной когнитивной нагрузки и является наиболее чувствительным к изменениям функционального состояния по сравнению с остальными. Джар установил, что данный индекс наиболее сильно увеличивается в центральных, теменных и височных областях при закрытых глазах и в теменных и височных областях при открытых глазах. Также он выявил уве-



Ирина Сергеевна Поликанова – кандидат психологических наук, специалист по учебно-методической работе кафедры физического воспитания и спорта Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова
E-mail: irinapolikanova@mail.ru



Александр Викторович Сергеев – заместитель заведующего кафедрой физического воспитания и спорта Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова
E-mail: haymovich@yandex.ru

личение дельта- и тета-активности во фронтальных, центральных и теменных регионах (Jar, 2009).

Одним из наиболее изученных параметров ЭЭГ является альфа-ритм. Альфа-ритм хорошо заметен в состоянии физического и умственного расслабления (Golojahani, 2012). На ЭЭГ в спокойном состоянии обычно отчетливо видно отдельный пик на частоте альфа-ритма (8-14 Hz). Данный параметр характеризуется высокой интраиндивидуальной стабильностью (Binni, 2003; Fernandez, 1993), достаточно сильной вариативностью между отдельными людьми и изменчивостью с возрастом (Klimesh, 1999). В исследовании Питерсона было показано, что у взрослого человека среднее значение индивидуального альфа-пика составляет 10.2 ± 0.9 Гц (Peterson, 1971). В целом ряде исследований показано, что альфа-пик увеличивается с детства до пубертата (Epstein, 1980). У взрослых людей, наоборот, альфа-пик с возрастом уменьшается – с 20 до 70 лет его частота падает в среднем с 10,89 Гц до 8,24 Гц (Klimesh, 1997).

Различные исследования показывают, что пик альфа-ритма положительно коррелирует с успешностью выполнения таких когнитивных функций как внимание, память, скоростью протекания информационных процессов (Angealakis, 2004; Klimesh, 1999). Частота индивидуального альфа-ритма возрастает больше в правом полушарии при выполнении зрительных заданий и в левом – при выполнении арифметических заданий (Angealakis, 2004). Климеш установил, что испытуемые со сниженными мнестическими способностями характеризуются снижением пика альфа-ритма во время выполнения заданий, задействующих память, а испытуемые с высокими мнестическими способностями характеризуются стабильностью пика альфа-ритма в различных условиях (Klimesh, 1993). Климеш также выявил, что испытуемые с высокими мнестическими способностями и высокой скоростью обработки информации характеризуются частотой альфа-пика в среднем на 1 Гц большей по сравнению с контрольной группой (Klimesh 1996, 1997). Наличие у испытуемых определенных психических заболеваний (болезнь Альцгеймера, шизофрения, синдром хронической усталости,

полушарный инсульт) также коррелирует со снижением пика альфа-ритма (Angealakis, 2004; Klimesh, 1999). Статистические наблюдения показали, что эта закономерность не зависит от возраста испытуемых, так как у здоровых людей той же возрастной группы – пик альфа-ритма выше (Klimesh, 1999). Интересным фактом является отсутствие увеличения пика после проведения лечения указанных заболеваний.

Гипотеза исследования

Основной гипотезой нашего исследования является предположение, что длительная когнитивная нагрузка, приводящая к развитию утомления, будет отражаться в значимых изменениях показателей, как субъективных (уменьшение показателей по шкалам методики САН), так и электрофизиологических (увеличение ИАР, ИУ, мощности в медленно-волновом спектре ЭЭГ).

Методика исследования

Испытуемые

В исследовании приняли участие 44 испытуемых мужского пола без каких-либо психических и неврологических заболеваний. Все испытуемые были правшами. Средний возраст составил 24 ± 6 лет.

Запись ЭЭГ

Запись ЭЭГ и выполнение методики САН в данном исследовании проводилась дважды: первый раз в начале эксперимента, второй – после длительной когнитивной нагрузки, представляющей собой выполнение различных когнитивных заданий, задействующих рабочую память и внимание в течение 2-2,5 часов. Запись ЭЭГ проводилась с помощью 256-канального электроэнцефалографа фирмы EGI Electrical Geodesics с частотой оцифровки 500 Гц и референтом в вертексе. Фоновая ЭЭГ состояла из двух периодов записи: 1 минуты с закрытыми глазами и 1 минуты с открытыми глазами. После записи ЭЭГ проводился ремонт и фильтрация в полосе от 1 до 150 Гц и удалением 50 Гц наводки от сети. Каждая запись ЭЭГ была автоматически просканирована на наличие артефактов. Участки ЭЭГ

с амплитудой более 200 мкВ в пределах окна в 640 мс отмечались как плохой канал, участки с амплитудой более 140 мкВ рассматривались как двигательный артефакт, а более 55 мкВ – как зрительный артефакт (Net Station software).

Анализ данных

Для статистического анализа данных использовались пакет Statistica 8 (для Windows, V 8.0, StatSoft), а также пакет MatLab (версия R2007b). Для статистического анализа данных использовались ANOVA и T-тест для зависимых выборок.

Для опросника САН подсчитывались средние значения и стандартные отклонения по четырем шкалам (самочувствие, активность, настроение, общий балл). Для анализа ЭЭГ использовались отрезки фоновой ЭЭГ длительностью 20 секунд с наименьшим содержанием артефактов в состояниях с закрытыми и открытыми глазами. Данные ЭЭГ были усреднены по 5 мозговым областям (лобной, центральной, височной, теменной и затылочной). На основе данных ЭЭГ были рассчитаны частота индивидуального альфа-ритма (ИАР) и индекс утомления (ИУ). Индивидуальный альфа-ритм рассчитывался как частота, на которой наблюдается максимальная мощность альфа-ритма в диапазоне от 7 до 14 Гц. Подсчет индивидуального альфа-ритма проводился с помощью программы MatLab. Индекс утомления был рассчитан как отношение суммы мощностей медленных ритмов (альфа- и тета-ритмов) к мощности быстрого ритма (бета): $IY = \text{альфа} + \text{тета} / \text{бета}$ (Jar et al., 2009; Cheng et al., 2011).

Результаты

Субъективные показатели

Методика САН

Результаты динамики субъективных показателей по методике САН показали значимое снижение показателя по шкалам Самочувствие, Активность и Общему баллу (T-тест для зависимых выборок). На основе полученных данных можно предположить, что когнитивное утомление ухудшает субъективное самочувствие и активность испытуемого, но, в то же время, не отражается на его настроении. В таблице 1 показаны средние

значения каждой шкалы опросника САН для обоих состояний (до и после влияния длительной когнитивной нагрузки).

Электрофизиологические показатели

Индивидуальный альфа-ритм

В таблице 2 представлены результаты ЭЭГ по показателю индивидуального альфа-ритма (ИАР) для 5 мозговых регионов в обоих полушариях (лобном, центральном, височном, теменном и затылочном) для обоих состояний (до и после когнитивной нагрузки).

Статистический анализ данных показал значимое снижение ИАР в правом полушарии. Результаты Т-теста показали значимое снижение частоты ИАР в правом полушарии в теменной, височной и затылочной областях.

В целях конкретизации полученных результатов была построена и проанализирована трехфакторная модель ANOVA. 1-й фактор – «состояние» (до или после когнитивной нагрузки), 2-й фактор – «мозговая область», 3-й фактор – «полушарие». Статистический анализ выявил значимое взаимодействие двух факторов: «состояние» и «полушарие» ($F(1,44)=5,74; p<0,02$). Это означает, что в разных полушариях ИАР изменяется разнонаправленно. В правом полушарии в фоновой записи ЭЭГ до нагрузки наблюдается более высокая частота ИАР, чем в левом полушарии. После утомления в правом полушарии наблюдается более сильное снижение частоты ИАР, хотя и не значимое. При этом различные области мозга не различают по частоте индивидуального альфа-ритма.

Индекс утомления.

Индекс утомления, отражающий отношение суммарной мощности альфа- и тета-ритмов к суммарной мощности бета-ритма ($FAT = \alpha + \theta / \beta$) (Jar et al, 2009), высчитывался отдельно для всех каналов в условия закрытых и открытых глаз для обоих состояний: до и после длительной когнитивной нагрузки. После проведения данного подсчета индекс утомления был усреднен по 5 мозговым регионам для обоих полушарий.

Статистический анализ (Т-тест) проводился отдельно, как для каждого электрода, так и для усредненных данных по мозговым областям для обоих полушарий. Т-тест для отдельных каналов выявил значимое увеличение индекса утом-

	Самочувствие	Активность	Настроение	Общий балл
До утомления	5,45	5,05	5,42	5,30
После утомления	4,61**	4,18**	5,23	4,69**

Ср. значения, шкала: 1-7 баллов

Таблица 1. Методика САН

Области мозга	ИАР, Гц/ст.откл.	
	До утомления	После утомления
Лобная левая	9,72 (0,98)	9,62 (0,99)
Лобная правая	9,79 (0,93)	9,63 (1,03)
Центральная левая	9,72 (0,93)	9,65 (1,09)
Центральная правая	9,75 (0,90)	9,57 (1,04)
Теменная левая	9,90 (0,93)	9,92 (0,98)
Теменная правая	10,16 (0,86)	9,87 (0,93)**
Височная левая	9,82 (0,91)	9,73 (0,98)
Височная правая	9,95 (0,80)	9,74 (0,89)*
Затылочная левая	10,01 (0,93)	9,82 (0,89)
Затылочная правая	10,12 (0,84)	9,83 (0,84)*

(*значимые изменения ($p \leq 0,05$); ** значимые изменения ($p \leq 0,01$))

Таблица 2. Частота индивидуального альфа-ритма до и после утомления.

Области мозга	Индекс утомления			
	закрытые глаза		открытые глаза	
	До утомления (ст.откл.)	После утомления (ст.откл.)	До утомления (ст.откл.)	После утомления (ст.откл.)
Лобная левая	4,59 (2,90)	4,94 (3,01)	5,80 (6,37)	5,42 (5,59)
Лобная правая	7,02 (2,58)	7,41 (2,52)	5,39 (4,12)	5,12 (3,73)
Центральная левая	3,50 (2,49)	4,04 (2,20)	2,86 (1,79)	3,75 (4,03)
Центральная правая	3,51 (2,54)	4,75 (2,56)**	2,89 (1,80)	3,94 (3,85)
Теменная левая	3,86 (3,03)	5,26 (3,32)**	2,92 (1,99)	4,23 (4,36)*
Теменная правая	5,20 (4,00)	6,47 (4,25)**	2,99 (2,07)	4,80 (4,74)*
Височная левая	3,05 (2,08)	3,98 (2,33)**	2,25 (1,30)	3,10 (3,43)
Височная правая	3,26 (2,33)	4,19 (2,90)**	2,21 (1,31)	3,16 (3,62)
Затылочная левая	3,85 (2,85)	4,51 (2,83)*	2,11 (1,32)	2,81 (3,41)
Затылочная правая	3,50 (2,49)	4,34 (2,58)**	2,12 (1,36)	3,00 (3,52)

*значимые изменения ($p \leq 0,05$)

** значимые изменения ($p \leq 0,01$)

Таблица 3. Индекс утомления до и после когнитивной нагрузки.

В правом полушарии, преимущественно в лобной и теменных областях, в условиях с закрытыми глазами наблюдается более высокое значение индекса утомления до и после когнитивной нагрузки. Это может свидетельствовать о доминировании в этом полушарии медленных ритмов

ления в 133 каналах из 257 в условиях с закрытыми глазами, и в 55 каналах – с открытыми глазами (рис. 1). В таблице 3 представлены значения индекса утомления со стандартными отклонениями по отдельным регионам. Статистический анализ Т-тест показал значимое увеличение индекса утомления в условиях с закрытыми глазами практически во всех регионах, кроме лобных и центральной левой области, а в

условиях с открытыми глазами – в теменных областях.

В целях конкретизации полученных результатов была построена и проанализирована трехфакторная модель ANOVA: 1-й фактор – «состояние» (до или после когнитивной нагрузки), 2-й фактор – «мозговая область», 3-й фактор – «полушарие». Статистический анализ показал значимое взаимодействие всех трех факторов в условиях с закрытыми гла-

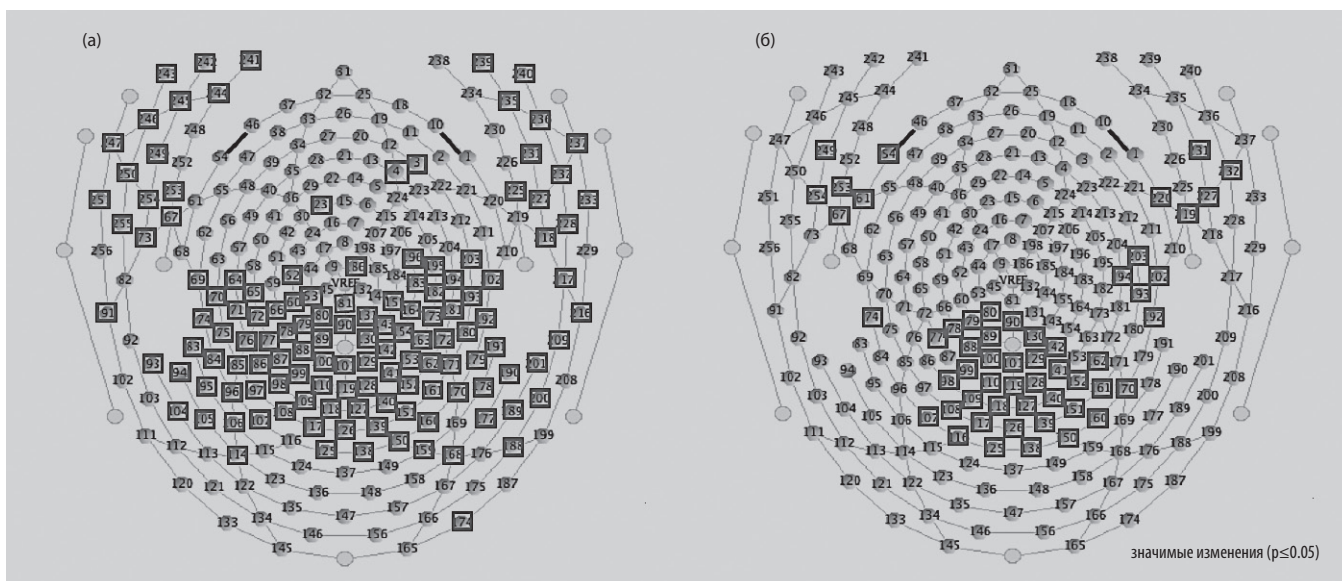


Рис 1. Значимое увеличение индекса утомления после когнитивной нагрузки в условиях с закрытыми (а) и открытыми (б) глазами.

Ритмы ЭЭГ	Диапазон	Закрытые глаза	Открытые глаза
Средняя мощность ЭЭГ			
Тета	3,5-7,5 Гц	↑ F(1,27)=7,98; p<0,009	-
Нижний альфа	7,5-10 Гц	↑ F(1,38)=13,413; p<0,0008	-
Верхний альфа	10-12,5 Гц	↑ F(1,37)=4,646; p<0,04	-
Альфа	7,5-12,5 Гц	↑ F(1,38)=12,694; p<0,002	-
Нижний бета	12,5-18 Гц	-	-
Верхний бета	18-35 Гц	↑ F(1,37)=5,558; p<0,04	-
Бета	12,5-35 Гц	↑ F(1,38)=5,399; p<0,03	-
Гамма	35-45 Гц	-	-
Относительная мощность ЭЭГ			
Тета	3,5-7,5 Гц	-	-
Нижний альфа	7,5-10 Гц	↑ F(1,43)=10,903; p<0,001	↑ F(1,43)=15,048; p<0,0004
Верхний альфа	10-12,5 Гц	-	↑ F(1,43)=5,08; p<0,03
Альфа	7,5-12,5 Гц	-	↑ F(1,43)=9,764; p<0,003
Нижний бета	12,5-18 Гц	-	↑ F(1,43)=4,651; p<0,04
Верхний бета	18-35 Гц	↓ F(1,43)=4,292; p<0,04	-
Бета	12,5-35 Гц	↓ F(1,43)=8,121; p<0,007	-
Гамма	35-45 Гц	-	-

Примечания. '↑' – увеличение мощности ритма, '↓' – уменьшение мощности ритма, '-' – значимых изменений не наблюдается. Статистический анализ проводился с помощью ANOVA до и после когнитивной нагрузки по 5 мозговым областям в левом и правом полушариях.

Таблица 4. Спектральный анализ. Результаты статистического анализа.

В правом полушарии, преимущественно в лобной и теменных областях, в условиях с закрытыми глазами наблюдается более высокое значение индекса утомления до и после когнитивной нагрузки. Это может свидетельствовать о доминировании в этом полушарии медленных ритмов

ами: «состояние», «мозговая область» и «полушарие» – F(4,172)=3,034; p<0,02. Это говорит о том, что индекс утомления, во-первых, значимо увеличивается с утомлением, а во-вторых, он по-разному изменяется в разных областях мозга и в разных полушариях. В условиях с открытыми глазами трехфакторная ANOVA показала зна-

чимое взаимодействие только двух факторов: «состояние» и «мозговая область» – F(4,172)=20,72; p<0,000004. Это означает, что индекс утомления значимо возрастает с утомлением, но в разных областях мозга по-разному. При этом не наблюдается значимых различий в изменении индекса утомления в разных полушариях.

В правом полушарии, преимущественно в лобной и теменных областях, в условиях с закрытыми глазами наблюдается более высокое значение индекса утомления до и после когнитивной нагрузки. Это может свидетельствовать о доминировании в этом полушарии медленных ритмов. По данным многочисленных исследований было установлено, что увеличение мощности медленных ритмов связано с развитием когнитивного утомления (Cheng et al, 2011; Boksem et al, 2006).

Спектральный анализ

Утомление также значимо отражается на изменении спектральных характеристик ЭЭГ. Спектральный анализ осуществлялся для 8 отдельных диапазонов. Для подсчета спектральных характеристик ЭЭГ использовалось 2 метода: усредненные мощности ритмов и натуральный логарифм (LN) относительной мощности. Значимые результаты получены преимущественно для медленных ритмов: тета- и альфа-ритмов, но значительные изменения наблюдались и в бета-диапазоне (таблица 4). Наиболее значимые и однозначные результаты получены для диапазона нижнего альфа-ритма (7,5-10 Гц), преимущественно в теменных и затылочных отведениях – после длительной когнитивной нагрузки наблюдается увеличение средней мощности данного диапазона при закрытых глазах и натурального логарифма относительной мощности при закрытых и открытых глазах.

Обсуждение результатов

Субъективные показатели

Проведенное исследование показало значимое снижение показателей по шкалам самочувствие и активность в методике САН. Многие авторы отмечают, что после длительной когнитивной деятельности испытуемые себя чувствуют намного хуже, чем до нее (Wijesuriya et al, 2007). Так, Трейо обнаружил, что после трех часов арифметических задач субъективная оценка по шкалам энергичность и спокойствие значимо снижаются, а значение по шкале усталость – значимо возрастает (Trejo et al, 2005).

Электрофизиологические показатели

Индивидуальный альфа-ритм

В настоящем исследовании было показано, что длительная когнитивная нагрузка отражается на уменьшении индивидуального альфа-ритма (ИАР), но значимое уменьшение наблюдается только в правом полушарии (ANOVA), Т-тест показал значимое снижение ИАР в теменной, височной и затылочной областях.

Ряд авторов выявили, что во время когнитивной нагрузки происходит увеличение индивидуальной частоты альфа-ритма, причем, чем сильнее умственная нагрузка, тем сильнее увеличение ИАР (Osaka, 1984). Также было установлено, что во время выполнения когнитивных заданий наблюдается снижение мощности альфа-ритма (Osaka, 1984; Glass et al, 1970). Различные исследования показывают, что пик альфа-ритма положительно коррелирует с различными когнитивными функциями: вниманием, памятью, скоростью протекания информационных процессов (Angealakis, 2004; Klimesh, 1999). ИАР больше возрастает в правом полушарии при выполнении зрительных заданий и в левом – при выполнении арифметических заданий (Angealakis, 2004).

Многие авторы отмечают, что при длительном выполнении когнитивных заданий, наоборот, имеет место снижение индивидуальной частоты альфа-ритма (Angealakis, 2004; Klimesh, 1999) и увеличение мощности медленных ритмов (альфа- и тета-ритмов) (Boksmen et al, 2005; Jap, 2009; Cheng, 2011, Trejo et al, 2005, Lal et al, 2007). Джап и Лэл установили, что

при длительной когнитивной нагрузке происходит смещение индивидуальной частоты альфа-ритма и общей мощности спектра в сторону медленных частот (Jap, 2009; Lal et al, 2007). Клиmesh выявил, что испытуемые с высокими мнестическими способностями и высокой скоростью обработки информации характеризуются частотой альфа-пика в среднем на 1 Гц большей по сравнению с контрольной группой (Klimesh, 1996, 1997). Испытуемые со сниженными мнестическими способностями характеризуются снижением пика альфа-ритма во время выполнения заданий, задействующих память, а испытуемые с высокими мнестическими способностями характеризуются стабильностью пика альфа-ритма в различных условиях (Klimesh, 1993). Нг и Равендран показали, что снижение ИАР происходит также после физического утомления и преимущественно в центральных областях (Ng et al, 2007).

Многими авторами было отмечено снижение частоты индивидуального альфа-ритма в состоянии утомления (Jap, 2009, Lal et al, 2007).

длительная когнитивная нагрузка, приводящая к состоянию утомления, отражается на изменении мощности почти всех диапазонов ЭЭГ. Наибольшие изменения наблюдаются в тета-, нижнем альфа-, альфа- и бета-диапазонах

Спектральный анализ

В нашем исследовании мы показали, что длительная когнитивная нагрузка, приводящая к состоянию утомления, отражается на изменении мощности почти всех диапазонов ЭЭГ. Наибольшие изменения наблюдаются в тета-, нижнем альфа-, альфа- и бета-диапазонах.

Тета-ритм

В диапазоне тета-ритма (3,5-7,5 Гц) мы получили значимое увеличение средней мощности в состоянии утомления после выполнения задания с закрытыми глазами. Это согласуется с многочисленными данными, описанными в литературе, которые также подтверждают увеличение мощности тета-ритма после длительной когнитивной нагрузки, которое в основном наблюдается в лобных областях (Boksmen et al, 2005; Jap, 2009; Cheng, 2011, Trejo et al, 2005, Lal et al, 2007).

В нашем исследовании наибольшая мощность тета-ритма наблюдалась в теменной области и по усредненным,

и по логифмированным данным. В большинстве случаев среднелобный тета-ритм регистрируется с максимумом в Fz, но иногда и в Pz (Кропотов, 2010). В исследованиях с использованием МЭГ (магнитоэнцефалографии) было показано, что существуют два основных источника тета-ритма: префронтальная средняя поверхность коры и передняя поясная извилина (Asada, 1999). В одном из исследований было установлено, что высокая выраженность среднелобного тета-ритма ассоциирована с самым низким уровнем тревожности и невротизации и самым высоким уровнем экстрасерии (Inanaga, 1998). Среднелобный тета-ритм также связан с активацией и уровнем метаболизма в средней лобной и передней поясной извилинах (Кропотов, 2010).

Среднелобный тета-ритм у человека очень часто связывают с гиппокампальной тета-активностью. Согласно Кропотову (Кропотов, 2010), тета-ритм возникает в стволе мозга, нейроны которого передают возбуждение норадренергическим клеткам в голубом пятне, серо-

тонинергическим клеткам в ядрах шва, дафаминергическим клеткам в передней части покрышки и компактной части черной субстанции. Эти клетки могут активироваться либо напрямую от коллатералей нейронов, либо через обратные проекции от коры, и в таком случае это ведет к активации клеток в ядрах перегородки в основании переднего мозга. Активация этих ядер приводит к вспышкам тета-ритма.

Ряд исследователей установили, что после умственного утомления наблюдается значимое увеличение мощности альфа- и тета-ритмов. В нашем исследовании мы также выявили значимое увеличение средней мощности тета-ритма по всем областям мозга после трех часов умственной нагрузки (Boksmen et al, 2005; Lal et al, 2007).

Буксем установил, что мощность тета-ритма после умственного утомления была больше в лобных срединных электродах, мощность нижнего альфа-ритма была больше в теменных областях,

высокого альфа-ритма – в затылочных электродах, а бета-ритм – в лобной области (F3, F4) (Boksmen et al, 2005). Сара Лол показала, что в процессе умственного утомления (в условиях вождения) происходит увеличение мощности тета-ритма и снижение мощности бета-ритма. В ее исследовании данные были усреднены по 19 каналам (Lal et al, 2007).

Таким образом, результаты нашего исследования в целом согласуются с данными других исследований, однако мы выявили, что наибольшие изменения в тета-диапазоне наблюдаются в центральных и теменных областях.

Альфа-ритм.

В нашем исследовании в спектре альфа-ритма мы получили наиболее значимые результаты в поддиапазоне нижнего альфа-ритма (7,5 – 10 Гц). Было показано, что на этих частотах наблюдается самое сильное увеличение мощности после утомления, причем, как средней, так и относительной мощности. В поддиапазоне верхнего альфа-ритма было также выявлено значимое увеличение мощности, но гораздо более слабое, чем в нижнем альфа-поддиапазоне. Было установлено также значимое увеличение мощности после утомления, но, как мы указывали раньше, это увеличение в основном образовалось за счет увеличения мощности нижнего альфа-ритма. Максимум средней мощности в поддиапазоне нижнего альфа-ритма наблюдался в теменной и в затылочной областях, а максимум относительной мощности – в теменной, центральной и затылочной областях. В поддиапазоне верхнего альфа-ритма максимумы мощностей также наблюдаются в теменной и затылочных областях. Эти результаты соответствуют данным, полученным Буксеном (Boksmen et al, 2005), который показал, что после длительной когнитивной нагрузки происходит увеличение мощностей нижнего и верхнего альфа-ритмов. При этом, мощность нижнего альфа-ритма была выше в теменной области, а верхнего – в затылочной.

В целом, полученные нами результаты соответствуют данным, полученным другими исследователями, что максимальный альфа-ритм регистрируется в затылочных и теменных областях при закрытых глазах (Кропотов, 2010; Голубева, 2005). В ряде работ было также

установлено увеличение мощности альфа-ритма при умственном утомлении (Boksmen et al, 2005; Trejo et al, 2005, Jap, 2009), хотя некоторые авторы отмечают уменьшение мощности альфа-ритма после длительной когнитивной нагрузки (Lal et al, 2007, Cheng, 2011). Клиmesh считает, что снижение мощности альфа-ритма после когнитивной нагрузки, например, после решения арифметических задач происходит из-за того, что такая деятельность требует задействования рабочей памяти, а это приводит к подавлению альфа-ритма на ЭЭГ (Klimesh, 1997).

Бета-ритм.

Мы установили, что наибольшие изменения мощности наблюдаются во всем бета-диапазоне, включающем нижний бета- и верхний бета-поддиапазоны. При относительной мощности бета-ритма наблюдалось уменьшение мощности после утомления, которое, видимо, связано с увеличением относительных мощностей медленных ритмов, а при средней мощности бета-ритма имело место значимое увеличение. Максимум средней мощности бета-ритма наблюдается в лобной области. Выявлено сильное увеличение бета-ритма после утомления в височных областях. Максимум относительной мощности также находится в лобной области. Это соответствует данным других исследований. Интересным результатом является выявление того факта, что в поддиапазоне верхнего бета-ритма (18-35 Гц) наблюдается уменьшение относительной мощности и увеличение средней мощности бета-ритма после утомления с четким максимумом в лобном отведении в обоих состояниях. А вот, в поддиапазоне нижнего бета-ритма (12,5–18 Гц) максимум мощности наблюдался в затылочной и теменной областях при относительной мощности, и в затылочной и лобной областях при средней мощности бета-ритма. Скорее всего, это связано с тем, что диапазон нижнего бета-ритма немного пересекается с полосой альфа-ритма – некоторые ученые выделяют альфа-ритм до 14 Гц. Мощность же альфа-диапазона намного выше, чем у бета и, таким образом, в нижнем бета-диапазоне может наблюдаться пик в затылочной области. Наши результаты соответствуют данным, полученным Буксеном (Boksmen et al, 2005), кото-

рый указывал, что после длительной когнитивной нагрузки происходит увеличение мощности бета-ритма во фронтальных отведениях. Клиmesh считает, что увеличение нижнего бета-ритма может быть связано с увеличением усилий, которые затрачивает испытуемый для поддержания высокой концентрации внимания, необходимой для успешного выполнения задания (Klimesh, 1999). Ряд исследователей отмечает, наоборот, уменьшение мощности бета-ритма после длительной когнитивной нагрузки (Jap, 2009; Lal et al, 2007).

Бета-ритмы чаще всего встречаются в лобных и центральных областях. Обычно выделяют два основных типа бета-ритмов: роландические бета-ритмы с максимумом в сенсомоторной области и лобные бета-ритмы с максимумом во фронтальных отведениях. Роландические бета-ритмы наблюдаются как спонтанная активность в сенсомоторных отведениях (C3, Cz, C4) с частотой почти в 2 раза большей, чем у роландического мю-ритма. Роландический бета-ритм генерируется при выполнении двигательных и когнитивных заданий (Кропотов, 2010). Кропотов считает, что активация роландического бета-ритма связана с фазой расслабления нейронной системы в сенсомоторной коре, которая наступает вслед за двигательной активностью, сопровождаемой глобальной активацией нейронов в сенсомоторной коре. Таким образом, увеличение роландической бета-активности является некоторой фазой расслабления, которую можно рассматривать как след постактивации (Кропотов, 2010).

Лобные бета-ритмы обычно регистрируются от лобных отведений (F3, Fz, F4). Модуляция лобных бета-ритмов наблюдается при решении когнитивных задач, связанных с принятием решения и оценкой стимула. Было показано, что мощность бета-ритма положительно коррелирует с метаболической активностью в соответствующей мозговой области (Jan Cook, 1998). Результаты нашего исследования соответствуют этим данным.

Индекс утомления

Индекс утомления, который отражает отношение медленных мозговых ритмов к быстрым (альфа+тета/бета), значительно увеличился почти во всех областях при закрытых глазах, кроме лобных

и левой центральной. При открытых глазах значимое увеличение наблюдалось только в теменной области (левой и правой).

Джап в своем исследовании показал, что алгоритм альфа+тета/бета имеет более сильное увеличение по сравнению с другими индексами: альфа/бета, альфа+тета/альфа+бета, тета/бета и является наиболее чувствительным к изменениям функционального состояния (Яр, 2009). Ченг с соавторами также выявили, что индекс альфа+тета/бета показывает более значимое изменение после длительной когнитивной нагрузки по сравнению с другими индексами: тета/альфа, бета/альфа (Cheng, 2011).

В нашем исследовании мы тоже установили значимое увеличение индекса утомления после длительной когнитивной нагрузки. При этом, увеличение этого индекса происходило в основном за счет увеличения мощности альфа- и тета-ритмов, так как в спектре бета-ритма также наблюдалось некоторое увеличение мощности после нагрузки.

Заключение

В исследовании подтвердилась гипотеза о том, что длительная когнитивная нагрузка, приводящая к развитию утомления, отражается в значимом сдвиге субъективных и электрофизиологических показателей. На субъективном уровне это

проявляется в снижении самочувствия и активности испытуемого, а на электрофизиологическом уровне – в снижении частоты индивидуального альфа-ритма в правом полушарии, увеличении индекса утомления почти по всем мозговым областям, а также в увеличении средней мощности тета-, альфа- и бета-ритмов.

На основе результатов, полученных в нашем исследовании, мы можем сделать вывод о том, что указанные электрофизиологические и субъективные параметры могут использоваться в качестве критериев когнитивного утомления.

*Исследование проводилось при поддержке гранта
РГНФ № 14-06-006989а*

Литература:

- Голубева Э.А. Способности. Личность. Индивидуальность. – 2005.
- Гусев А.Н., Сильницкая А.С. Сравнительный анализ влияния демонстративности, гипертимности и дистимности на интонационные параметры речи // Национальный психологический журнал. – 2013. – № 1(9). – С. 110-121.
- Кропотов Ю.Д. Количественная ЭЭГ, когнитивные вызванные потенциалы мозга человека и нейротерапия. – Санкт-Петербург, 2010.
- Angelakis E., Lubar J.F., Stathopoulou S., Kounios J. Peak alpha frequency: an electroencephalographic measure of cognitive preparedness // Clin. Neurophysiol. – 2004. – 115. – 887-897.
- Asada H., Fukuda Y., Tsunoda S., Yamaguchi M., Tonoike M. Frontal midline theta rhythms reflect alternative activation of prefrontal cortex and anterior cingulate cortex in humans. // Neuroscience Letters. – 1999. – 274. – 29-32.
- Boksem M.A.S., Meijman T.F., Lorist M.M., 2006. Mental fatigue, motivation and action monitoring // Biol. Psychol. – 2006. – 72. – 123-132.
- Cheng Shyh-Yueh, Hsu Hong-Te Mental Fatigue Measurement Using EEG, Risk Management Trends. Giancarlo Nota (Ed.), 2011.
- Cook I.A., O'Hara R., Uijtdehaage S.H., Mandelkern M., Leuchter A.F. Assessing the accuracy of topographic EEG mapping for determining local brain function // Electroencephalogr Clin Neurophysiol. – 1998. – 107(6). – 408-414.
- Epstein H.T. EEG developmental stages // Dev. Psychobiol. – 1980. – 13. – 629-631.
- Ergenoglu T., Demiralp T., Bayraktaroglu Z., Ergen M., Beydagi H., Uresin Y. Alpha rhythm of the EEG modulates visual detection performance in humans // Cognitive Brain Research. – 2004. – 20. – 376-383.
- Fernandez T., Harmony T., Rodriguez M., Reyes A., Marosi E., Bernal J. Test-retest reliability of EEG spectral parameters during cognitive tasks: I. Absolute and relative power // Neurosci. – 1993. – 68. – 255-261.
- Glass A. and Kwiatkowski A.W. (1970) Power spectral density changes in the EEG during mental arithmetic and eye-opening // Psychologische Forschung. – 1970. – 33. – 85-99.
- Goljahani A., D'Avanzo C., Schiff S., Amadio P., Bisiacchi P., Sparacino G. A novel method for the determination of the EEG individual alpha frequency // Neuroimage. – 2012. – 60. – 774-786.
- Inanaga K. (1998) Frontal midline theta rhythm and mental activity // Psychiatry Clin Neurosci. – 1998. – 52(6). – 555-566.
- Яр В.Т., Lal S., Fischer P., Bekiaris E. Using EEG spectral components to assess algorithms for detecting fatigue // Expert Systems with Applications. – 2009. – 36. – 2352-2359.
- Klimesch W. 1997. EEG-alpha rhythms and memory processes // International Journal of Psychophysiology. – 1997. – 26. – 319-340.
- Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis // Brain Res. Brain Res. Rev. – 1999. – 29. – 169-195.
- Kozlovskiy S.A., Pyasik M.M., Vartanov A.V., Nikonova E.Yu. Verbal working memory: magnetic resonance, morphometric analysis and a psychophysiological model // Psychology in Russia: State of the Art. – 2013. – 6(3). – 19-30.
- Lal S., Bekiaris E. The Reliability of Sensing Fatigue from Neurophysiology. AusWireless 2006 // International Conference on Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications Proceeding. – 2007.
- Lorist M.M., Boksem M.A.S., Ridderinkhof K.R. Impaired control and reduced cingulate activity during mental fatigue // Brain Res Cogn Brain Res. – 2005. – 24. – 199-205.
- Lorist M.M., Klein M., Nieuwenhuis, S., Jong R., Mulder G., Meijman T.F. Mental fatigue and task control: Planning and preparation // Psychophysiology. 2000. – 37. – 614-625.
- Ng S.C., Raveendran P. EEG Peak Alpha Frequency as an Indicator for Physical Fatigue, 11th Mediterranean Conference on Medical and Biomedical

Engineering and Computing. – 2007.

Osaka M. Peak alpha frequency of EEG during a mental task: task difficulty and hemispheric differences // *Psychophysiology*. – 1984. – 21. – 101-105.

Petersen I., Eeg-Olofsson O. The development of the electroencephalogram in normal children from the age of 1 through 15 years – Non-paroxysmal activity // *Neuropaediatrie*. – 1971. – 2. – 375-404.

Trejo L.J., Kochavia R., Kubitzb K., Montgomery L.D., Rosipala R., Matthews B. EEG-based Estimation of Cognitive Fatigue. – 2005.

Trejo L.J., Knuth K., Prado R., Rosipal R., Kubitz K., Kochavi R., Matthews B. and Zhang Yu. EEG-Based Estimation of Mental Fatigue: Convergent Evidence for a Three-State Model. – 2007.

Wijesuriya N., Tran Y., Craig A. The psychophysiological determinants of fatigue // *International Journal of Psychophysiology*. – 2007. – 63. – 77-86.

References:

Angelakis, E., Lubar, J.F., Stathopoulou, S., & Kounios, J. (2004) Peak alpha frequency: an electroencephalographic measure of cognitive preparedness. *Clinical Neurophysiology*, 115, 887-897.

Asada, H., Fukuda, Y., Tsunoda, S., Yamaguchi, M., & Tonoike, M. (1999) Frontal midline theta rhythms reflect alternative activation of prefrontal cortex and anterior cingulate cortex in humans. *Neuroscience Letters*, 274, 29-32.

Boksem, M.A.S., Meijman, T.F., & Lorist, M.M. (2006) Mental fatigue, motivation and action monitoring. *Biological Psychology*, 72, 123-132.

Cheng, Shyh-Yueh, Hsu, Hong-Te (2011) Mental Fatigue Measurement Using EEG, *Risk Management Trends*. Giancarlo Nota (Ed.).

Cook, I.A., O'Hara, R., Uijtdehaage, S.H., Mandelkern, M., & Leuchter, A.F. (1998) Assessing the accuracy of topographic EEG mapping for determining local brain function. *Electroencephalograph Clinical Neurophysiology*, 107(6), 408-414.

Epstein, H.T. (1980) EEG developmental stages. *Developmental Psychobiology*, 13, 629-631.

Ergenoglu, T., Demiralp, T., Bayraktaroglu, Z., Ergen, M., Beydagi, H., & Uresin, Y. (2004) Alpha rhythm of the EEG modulates visual detection performance in humans. *Cognitive Brain Research*, 20, 376-383.

Fernandez, T., Harmony, T., Rodriguez, M., Reyes, A., Marosi, E., & Bernal, J. (1993) Test-retest reliability of EEG spectral parameters during cognitive tasks: I. Absolute and relative power. *Neuroscience*, 68, 255-261.

Glass, A. & Kwiatkowski, A.W. (1970) Power spectral density changes in the EEG during mental arithmetic and eye-opening. *Psychologische Forschung*, 33, 85-99.

Goljahani, A., D'Avanzo, C., Schiff, S., Amodio, P., Bisiacchi, P., & Sparacino, G. (2012) A novel method for the determination of the EEG individual alpha frequency. *Neuroimage*, 60, 774-786.

Gusev, A.N., & Silnitskiy, A.S. (2013) Sravnitel'nyy analiz vliyaniya demonstrativnosti, gipertimnosti i distimnosti na intonatsionnye parametry rechi [A comparative analysis of ostentation, hyperactivity, dysthymia and their impact on the speech intonation parameters]. *Natsional'nyy psikhologicheskii zhurnal [National psychological journal]*. 1 (9), 110-121.

11. Golubeva, E.A. (2005) Sposobnosti. Lichnost'. Individual'nost'. [Abilities. Personality. Individuality].

Inanaga, K. (1998) Frontal midline theta rhythm and mental activity. *Psychiatry Clinical Neuroscience*, 52(6), 555-566.

Jap, B.T., Lal, S., Fischer, P., & Bekiaris, E. (2009) Using EEG spectral components to assess algorithms for detecting fatigue. *Expert Systems with Applications*, 36, 2352-2359.

Klimesch, W. (1997) EEG-alpha rhythms and memory processes. *International Journal of Psychophysiology*, 26, 319-340.

Klimesch, W. (1999) EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Res. Brain Res. Rev*, 29, 169-195.

Kozlovskiy, S.A., Pyasik, M.M., Vartanov, A.V., & Nikonova, E.Yu. (2013) Verbal working memory: magnetic resonance, morphometric analysis and a psychophysiological model. *Psychology in Russia: State of the Art*. 6(3). 19-30.

Kropotov, Yu.D. (2010) Kolichestvennaya EEG, kognitivnye vyzvannye potentsialy mozga cheloveka i neyroterapiya [Quantitative EEG, cognitive evoked potentials of the human brain and neurotherapy]. St. Petersburg.

Lal, S., Bekiaris, E. (2007) The Reliability of Sensing Fatigue from Neurophysiology. *AusWireless 2006: International Conference on Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications Proceedings*.

Lorist, M.M., Boksem, M.A.S., Ridderinkhof, K.R. Impaired control and reduced cingulate activity during mental fatigue (2005) *Cognitive Brain Research*, 24, 199-205.

Lorist, M.M., Klein, M., Nieuwenhuis, S., Jong, R., Mulder, G., & Meijman T.F. (2000) Mental fatigue and task control: Planning and preparation. *Psychophysiology*, 37, 614-625.

Ng, S.C., Raveendran, P. (2007) EEG Peak Alpha Frequency as an Indicator for Physical Fatigue, 11th Mediterranean Conference on Medical and Biomedical Engineering and Computing.

Osaka, M. (1984) Peak alpha frequency of EEG during a mental task: task difficulty and hemispheric differences. *Psychophysiology*, 21, 101-105.

Petersen, I., Eeg-Olofsson, O. (1971) The development of the electroencephalogram in normal children from the age of 1 through 15 years – Non-paroxysmal activity. *Neuropaediatrie*, 2, 375-404.

Trejo, L.J., Kochavia, R., Kubitzb, K., Montgomery, L.D., Rosipala, R., & Matthews, B. (2005) EEG-based Estimation of Cognitive Fatigue.

Trejo, L.J., Knuth, K., Prado, R., Rosipal, R., Kubitz, K., Kochavi, R., Matthews, B. & Zhang, Yu. (2007) EEG-Based Estimation of Mental Fatigue: Convergent Evidence for a Three-State Model.

Wijesuriya, N., Tran, Y., Craig, A. (2007) The psychophysiological determinants of fatigue. *International Journal of Psychophysiology*, 63, 77-86.